

DOI: 10.24850/j-tyca-2025-03-10

Notas

Tratamiento de aguas residuales municipales: ¿son los sistemas UASB + lagunas con microalgas una opción?

Municipal wastewater treatment: Are UASB + microalgal open ponds an option?

Juan Manuel Morgan-Sagastume¹, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-7054-9333>

María Teresa Orta-Ledesma², ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9936-1997>

¹Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, México, jmms@pumas.ii.unam.mx

²Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, México, Mortal@iingen.unam.mx

Autor para correspondencia: Juan Manuel Morgan-Sagastume, jmms@pumas.ii.unam.mx

Resumen

Se resaltan las ventajas técnicas y económicas de los trenes de tratamiento de aguas residuales municipales con base en lagunas con microalgas, previo tratamiento con reactores anaerobios tipo UASB en



comparación con las tecnologías convencionales más usadas en el ámbito municipal mexicano. Las microalgas absorben compuestos inorgánicos (macro y micronutrientes), y reducen la carga inorgánica y orgánica presente en las aguas residuales, con la consecuente generación de biomasa. En ello radica la principal ventaja de esta tecnología sobre las otras convencionales mayormente utilizadas en el ámbito municipal mexicano. El tren de tratamiento con base en lagunas con microalgas asegura la no emisión de gases de efecto invernadero (GEI), y es el único que posee potencial para la valorización de subproductos en el mercado a través de la cosecha y el procesamiento de las microalgas, lo cual, en un ámbito regional adecuado, donde se puedan comercializar estos subproductos, puede representar ingresos adicionales para la sustentación operativa de la PTAR, pues pueden alcanzar o superar el bajo nivel de costo operativo de los sistemas lagunares convencionales. Los trenes de tratamiento utilizando un reactor UASB y lagunas con microalgas prácticamente tienen el mismo costo de inversión que los trenes con UASB y lagunas convencionales. Por otra parte, el costo de inversión de las lagunas convencionales sin reactor UASB es superior al tren con lagunas con microalgas. Aquellos municipios que cuenten con lagunas convencionales son candidatos para convertir o rehabilitar sus PTAR en sistemas lagunares con microalgas, donde se aprovecharía al máximo la infraestructura ya existente, lo que conlleva la disminución del costo de inversión en comparación con una instalación nueva. El sistema UASB con lagunas con microalgas es una buena opción por considerar para el tratamiento de aguas residuales municipales.

Palabras clave: costos de plantas de tratamiento de aguas residuales, reúso de agua tratada, reactor UASB, normas ambientales mexicanas, lagunas con microalgas.

Abstract

The technical and economic advantages of municipal wastewater treatment trains based on lagoons with microalgae, after treatment with UASB-type anaerobic reactors, are highlighted in comparison with the conventional technologies most used in the Mexican municipal area. Microalgae absorb inorganic compounds (macro and micronutrients) and reduce the inorganic and organic load present in wastewater with the consequent generation of biomass. This is the main advantage of this technology over the other conventional ones mostly used in the Mexican municipal sphere. The waste water treatment plant (WWTP) based on lagoons with microalgae ensures the non-emission of Greenhouse Gases (GHG) and is the only one that has the potential for the valorization of byproducts in the market through the harvesting and processing of microalgae, which, in an appropriate regional scope, where these byproducts can be commercialized, they can represent additional income for the operational support of the WWTP, being able to reach or exceed the low level of operating cost of conventional lagoon systems. The WWTP using a UASB reactor and lagoons with microalgae practically have the same investment cost as those plants with UASB and conventional lagoons. On the other hand, the investment cost of conventional lagoons without a UASB reactor is higher than that of lagoons with microalgae. Those municipalities that have conventional lagoons are candidates to convert or rehabilitate their WWTPs into lagoon systems with microalgae

where the existing infrastructure would be fully utilized, which leads to a reduction in the investment cost compared to a new installation.

Keywords: Costs of wastewater treatment plants, treated water reuse, UASB Reactor, Mexican environmental standards, microalgae lagoons, municipal wastewater treatment.

Recibido: 02/10/2023

Aceptado: 13/02/2024

Publicado *online*: 05/03/2024

Introducción

En la actualidad, en México, la acumulación de problemas y conflictos del agua es muy elevada; por otro lado, la tasa de oferta de soluciones efectivas es muy baja. En marzo de 2011, la Comisión Nacional del Agua (Conagua) publicó la Agenda 2030 del agua y señalaba que el costo de remediar los problemas acumulados (deterioro del suministro de agua potable, falta de saneamiento doméstico, ríos contaminados, flujos de aguas subterráneas destruidos y avenidas no controladas, entre otros) se elevaba a más de 100 mil millones de pesos (Conagua, 2012). En este sentido, se menciona en el Programa Nacional Hídrico (PNH) 2020-2024 (Conagua, 2020), que en 2017 las industrias en conjunto generaron dos millones de toneladas de demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅) y las descargas municipales aportaron hasta un 340% más de contaminantes a los cuerpos de agua superficial.

Para atender en parte este problema, el Gobierno Federal actualizó en marzo de 2022 la norma referente a los límites máximos permisibles del agua residual tratada vertida a bienes nacionales NOM-001-SEMARNAT-2021 (Semarnat, 2022), que se volvió más estricta.

Dentro de los factores más importantes, la nueva norma modifica los límites máximos de descarga de la temperatura de 40 a 35 °C, y del nitrógeno y fósforo total. A diferencia de la antigua norma (NOM-001-SEMARNAT-1996), ahora para nitrógeno pide su remoción indistintamente del tipo de cuerpo receptor A, B o C, con valores que oscilan entre 15 y 25 mg/l para el promedio mensual; para el fósforo, los valores especificados oscilan entre 5 y 15 mg/l, según sea el tipo de cuerpo receptor de la descarga.

Por otra parte, la nueva norma añade la demanda química de oxígeno (DQO) en sustitución de la DBO₅; también agrega la toxicidad aguda.

Aunado a lo anterior, se adiciona el parámetro de color verdadero con tres longitudes de onda que abarcan casi por completo el espectro de color visible y no se limita solamente al color amarillento de la escala Pt-Co utilizado típicamente para la medición de este parámetro. Sin duda, este parámetro fue dedicado a regular todas aquellas descargas con colores diversos que se presentan, entre otras, los de la industria textil y alimentaria.

Sin embargo, el punto más importante en cuanto al reto técnico-económico que supone la publicación de la nueva norma lo define la regulación de los nutrientes (nitrógeno y fósforo). Con base en ello se deben ajustar temperatura, DQO, toxicidad y color verdadero. Una planta

de tratamiento de aguas residuales que esté orientada a la remoción de nutrientes, por sí sola, en términos generales debe tender a cumplir automáticamente con estos parámetros (Morgan-Sagastume, Castro-Martínez, & Noyola, 2022). La eliminación de nutrientes de las aguas residuales implica contar con plantas de tratamiento más complejas en su conceptualización técnica, y demandará más recursos para su operación, manutención y sostenibilidad (Amy *et al.*, 2017), claro que ello dependerá de la tecnología a seleccionar para llevar a cabo el tratamiento de dichas aguas residuales.

Contexto en México

La infraestructura existente para cumplir con el saneamiento del agua residual se compone de: 1) servicio de cobertura de alcantarillado y 2) del tratamiento de aguas residuales tanto de origen municipal como industrial. Dentro del primer rubro se tiene que en promedio el 78.2% de los hogares está conectado a la red pública de drenaje, sin embargo, en estados como Yucatán y Campeche, se reduce a 3.6 y 6.6%, respectivamente (Conagua, 2021). En cuanto al tratamiento de aguas residuales, a finales de 2021 se contaba con 2872 plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) municipales, mismas que trataban un caudal de 145341 l/s, lo que equivale al 67.5% del agua residual generada y colectada por los sistemas de alcantarillado. El proceso predominante en cuanto a caudal tratado son los lodos activados (73.4%), seguido de lagunas de estabilización (10.3%). A partir de datos de 2019 (Conagua, 2021), se resalta que el 77.6% de las PTAR corresponde a plantas con

capacidades de 0 a 25 l/s, lo cual refleja una excesiva segmentación de plantas en el país.

En 2013, después de la evaluación técnica en campo de 234 PTAR (muestra de un 10% en ese año) de tipo municipal efectuada por el Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) para la Conagua (Morgan-Sagastume, 2016), con capacidad menor a 100 l/s y 233 PTAR con capacidad mayor a 100 l/s, se encontró que el porcentaje de plantas en funcionamiento y en un estado de mantenimiento adecuado tiende a ser mejor en PTAR grandes (mayores a 100 l/s) que en las pequeñas (menores a 100 l/s). Ejemplo de ello es que el 54 % de las PTAR con capacidad menor a 100 l/s se encontraba en operación, pero menos del 50% de estas lo hacía adecuadamente (cumpliendo la normatividad vigente en ese año); mientras que las PTAR con capacidad mayor a 100 l/s lo hacían en un 82%, esto se debe a la mayor capacidad de gestión administrativa y de operación, lo que les permite subsistir durante su vida útil proyectada (Morgan-Sagastume, 2016).

En cuanto a las PTAR con caudales menores a 100 l/s, donde existe mayor ineficiencia y abandono, destaca la subutilización de su caudal instalado con respecto al real y el muy bajo control operativo, esto debido a que la mayoría de las PTAR no contaba con personal operativo en ninguno de los turnos. El factor clave encontrado por lo cual las PTAR se encontraron abandonadas fue el consumo de energía eléctrica y reactivos; la inmensa mayoría de los municipios en el país no cuenta con recursos económicos suficientes para sostener la operación y el mantenimiento de las PTAR (en especial las altamente mecanizadas); por ello la importancia

de una adecuada selección tecnológica al momento de decidir invertir en esta infraestructura.

Al hacer el balance de la capacidad estimada que posee el país para proporcionar el tratamiento a las aguas residuales de tipo municipal, derivado de los datos de este estudio realizado en 2013 (Morgan-Sagastume, 2016), se pudo concluir que ello es del orden del 29% de las aguas residuales municipales descargadas a drenaje, lo cual no corresponde al 56 % reportado oficialmente para ese año.

Coyuntura para la rehabilitación y mejora de las PTAR

En el contexto actual, donde se presume que esta situación no ha cambiado y posiblemente ha empeorado, se determina una coyuntura favorable para ajustar programas oficiales enfocados a la rehabilitación de las PTAR municipales y construcción de nuevas plantas, así como definir tecnologías.

En el ámbito del mercado mexicano, las PTAR deben proporcionar opciones eficientes para el tratamiento de las aguas residuales para el cumplimiento de la normatividad vigente; esto, a un bajo costo de inversión, pero sobre todo de operación y mantenimiento. Deben contar con potencial para incorporarlas a un esquema de economía circular en la región, con el objeto de coadyuvar a su sostenibilidad y de aportar a los compromisos que tiene el país en cuanto a la mitigación de las emisiones de gases de efecto invernadero.

En ese sentido se debe tomar en cuenta la tecnología basada en lagunas con microalgas, la cual se describe a continuación.

Tecnología con base en lagunas con microalgas

La conceptualización básica de un tren de tratamiento de aguas residuales en el ámbito municipal con base en lagunas tipo herradura de microalgas (Figura 1) sería de la siguiente forma:

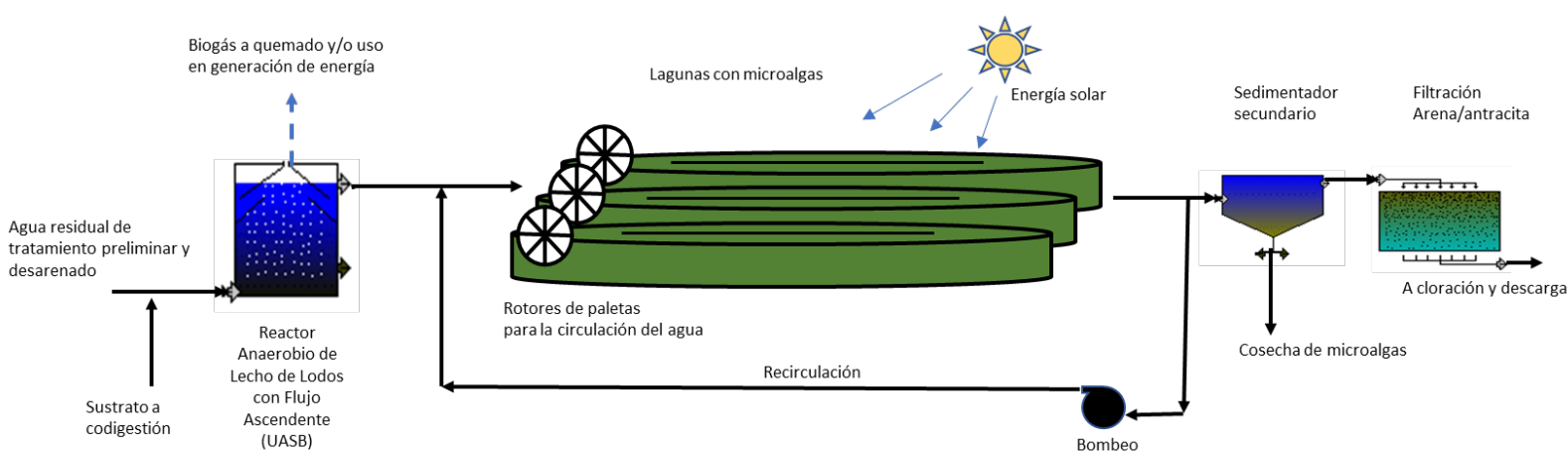


Figura 1. Conceptualización general del sistema lagunar con microalgas para el tratamiento de aguas residuales municipales.

Unidad para el tratamiento preliminar: unidad de rejillas, unidad de desarenación y un medidor hidráulico de caudal de agua (por ejemplo, un *Parshall*). La función de esta unidad es la retención de material sólido no biodegradable como basura en general, material vegetal y arena, que es arrastrada en los drenajes combinados existentes en las ciudades del país.

Unidades para el tratamiento secundario: esta etapa del tratamiento se orienta a la eliminación de material biodegradable primordialmente soluble. Se recomienda ampliamente el uso del reactor

anaerobio de lecho de lodos con flujo ascendente (UASB por sus siglas en inglés, *Upflow Anaerobic Sludge Blanket*) seguido de la laguna con microalgas con un sedimentador secundario y un sistema de recirculación de agua. Se considera que la incorporación del reactor UASB, al ser una tecnología compacta, de alta tasa de degradación de materia orgánica y controlable en cuanto a su operación (Chernicharo, Van Lier, Noyola, & Bressani-Ribeiro, 2015), es crucial dentro del tren de tratamiento, pues permite la contención de sobrecargas orgánicas que se llegaran a presentar, frecuentes en el ámbito municipal por descargas industriales al drenaje municipal (Conagua, 2021), además de que elimina la materia orgánica en un 60 a 70% (como DQO) sin requerimiento de energía, y favorece el incremento de nitrógeno amoniacal y fósforo en el efluente (Amy *et al.*, 2017), lo que es benéfico y requerido para el crecimiento de la biomasa en la laguna con microalgas. Además de lo anterior, la incorporación de un reactor anaerobio tipo UASB al tren de tratamiento tiene el potencial de tratar sustratos en codigestión; es decir, se puede tratar no solamente la materia orgánica contenida en el agua residual sino también lodo u otro sustrato que aporte materia orgánica, por ejemplo, las mismas microalgas cosechadas, y la fracción orgánica de los residuos sólidos municipales o lixiviados (Mustafa, Phang, & Chu, 2012). Con ello se podría establecer una planta procesadora, no solamente de agua, sino de otros sustratos que incrementan el potencial de producción de energía a través del biogás, además de aportar nutrientes para las microalgas. Con ello pudiera ser factible satisfacer en su totalidad la demanda energética de la planta, además de dar el servicio de tratamiento de residuos con el favorable impacto ambiental que ello implica.

En la laguna con microalgas se establece un consorcio simbiótico heterotrófico y fototrófico entre bacterias aerobias y las microalgas (Craggs, Heubeck, Lundquist, & Benemann, 2011); es decir, las primeras degradan la materia orgánica suministrada por el efluente anaerobio utilizando el oxígeno disuelto que las microalgas han incorporado al agua. Como resultado de esta oxidación aerobia de la materia orgánica, se produce CO_2 , el cual es la fuente de suministro de carbón para las microalgas (Grobbelaar, 2004).

Las microalgas absorben compuestos inorgánicos (macro y micro nutrientes) y reducen la carga inorgánica y orgánica presente en las aguas residuales con la consecuente generación de biomasa (Gonçalves, Pires, & Simões, 2017); en ello radica la principal ventaja de esta tecnología sobre las otras convencionales mayormente utilizadas en el ámbito municipal mexicano, pues es posible dar cumplimiento a una normatividad que implique la remoción de nutrientes tanto para descarga de agua tratada a cuerpos de agua como para reúso de agua. Derivado de que las bacterias toman el oxígeno de las microalgas, no se requiere del soplado de aire al sistema, lo que implica una disminución muy importante en costos de inversión y, sobre todo, de operación y mantenimiento de las PTAR, en comparación con sistemas de lodos activados o sistemas en general que requieran del suministro de oxígeno mediante elementos mecánicos.

Sin embargo, hay que mencionar que un reto técnico a resolver es la eliminación de la biomasa microalgal en el agua tratada (Wang, Li, Wu, & Lan, 2008). Aunque se retiene con fines de recuperación un alto porcentaje de ella en el sistema de sedimentación secundaria y en el filtrado con arena y antracita, puede subsistir cierta coloración verde en

el agua (debida a la presencia de las microalgas); sin embargo, dicha coloración puede ser eliminada con una baja dosis de ozono (Orta, Monje-Ramírez, Velasquez-Orta, Rodríguez-Muñiz, & Yáñez-Noguez, 2017). Según sea la intensidad del color en el efluente, se decidiría la incorporación de este sistema al tren de tratamiento.

De acuerdo con Velasquez-Orta, García-Estrada, Monje-Ramírez, Harvey y Orta (2014), el papel que juegan las microalgas en el tratamiento del agua residual se fundamenta en los siguientes lineamientos:

- Las microalgas asimilan una cantidad considerable de nutrientes debido a sus requerimientos de nitrógeno y fósforo para la formación de proteínas, ácidos nucleicos y fosfolípidos (que constituye del 45 al 60% de su peso seco).
- Pueden acumular metales pesados por adsorción física, absorción química, intercambio de iones o reacciones de óxido-reducción, además de que pueden secretar metabolitos que promuevan la quelación con los metales y el aumento del pH asociado favorece la precipitación de los mismos.
- Debido al aumento del pH, la temperatura y el nivel de oxígeno disuelto, las microalgas son capaces de favorecer la desactivación de patógenos potenciales, así como la precipitación de ortofosfatos.

La biomasa microalgal generada puede ser recuperada y utilizada como materia prima para producir productos de valor agregado, como biocombustibles (biogás, biodiesel, bioetanol), fertilizantes, mejoradores de suelos, bioplásticos o alimento para animales (Zhang *et al.*, 2020; Maroušek, Maroušková, Gavurová, Tuček, & Strunecký, 2023). La

producción de biomasa microalgal utilizando agua residual ofrece ventajas sobre las demás tecnologías porque se aprovechan los nutrientes del agua para el crecimiento de las microalgas y ello facilita el cumplimiento de una normatividad que restrinja la descarga de nutrientes a cuerpos de agua. Además, el sistema de lagunas con microalgas posee el potencial de capturar CO₂ del medio ambiente, lo que contribuye a disminuir de la atmósfera este gas de efecto invernadero (GEI) (Díaz-Trujillo, Tovar-Facio, Nápoles-Rivera, & Ponce-Ortega, 2019; Orta, Velasquez-Orta, Monje-Ramírez, & Yañez, 2021). En ese mismo sentido, los sistemas microalgales pueden ser utilizados para depurar el biogás y generar biometano a través de la eliminación del CO₂ y de la oxidación del H₂S (Bahr, Díaz, Domínguez, González-Sánchez, & Muñoz, 2014; Velasco *et al.*, 2023). Tales sistemas son verdaderos reservorios para la producción de O₂ y captura de CO₂.

Estas características técnicas de las lagunas con microalgas llaman la atención para ser aplicadas en el ámbito municipal, sin embargo, para poder definir ello con certeza es preciso tocar el tema del costo de inversión y, sobre todo, el de operación y mantenimiento.

El consumo de energía asociado con las lagunas con microalgas tiene que ver principalmente con el sistema que da impulso al agua en los estanques o canales de caudal continuo abiertos a la atmósfera con una configuración tipo herradura (*Raceways*) (mezclador de propelas o bombas centrífugas) y con la recirculación que se hace de agua tratada en el sistema. Se prescinde de la oxigenación mediante el soplado mecánico de aire.

Objetivo

En este documento se describen las ventajas técnicas-económicas que tiene un tren de tratamiento de aguas residuales conformado por un reactor anaerobio de lecho de lodos con flujo ascendente (UASB por sus siglas en inglés) seguido de lagunas con microalgas sobre las tecnologías convencionales más utilizadas en el ámbito municipal en México en el contexto de la publicación de la nueva norma NOM-001-SEMARNAT-2021.

Se presenta una estimación de costos de inversión y operación de las tecnologías sujetas a comparación y resalta el tren de tratamiento UASB + lagunas con microalgas. Ello sirve de base para sustentar la conclusión sobre si es una buena opción o no, en el contexto actual, el uso de estos sistemas en el ámbito municipal.

Materiales y métodos

Trenes de tratamiento de aguas residuales considerados

Se presenta una estimación del costo de inversión y operación para cada tren de tratamiento mayormente utilizado en el ámbito municipal en México.

Los trenes de tratamiento se componen de los siguientes elementos u operaciones unitarias, como pretratamiento y tratamiento primario, tratamiento secundario con reactor anaerobio (UASB), tratamiento secundario sin reactor anaerobio y tratamiento terciario.

Los trenes de tratamiento considerados son los siguientes:

Tren 1: tratamiento preliminar + desarenador + UASB (sin desinfección).

Tren 2: tratamiento preliminar + desarenador + UASB + filtro percolador (FP) + filtración con cloración.

Tren 3: tratamiento preliminar + desarenador + UASB + humedal artificial (*Wetland*) + cloración.

Tren 4: tratamiento preliminar + desarenador + UASB + laguna de pulimento + cloración.

Tren 5: tratamiento preliminar + desarenador + sistema lagunar + cloración.

Tren 6: tratamiento preliminar + desarenador + UASB + lodos activados en su versión completamente mezclada + filtración con cloración.

Tren 7: tratamiento preliminar + desarenador + UASB + laguna con microalgas + filtración con cloración.

Para consultar la descripción de las tecnologías antes comentadas y las consideraciones hechas para su conceptualización y costeo (excepto el tren 7 que se calculó para esta publicación), se recomienda consultar a Noyola, Morgan-Sagastume y Güereca (2013), y a Morgan-Sagastume *et al.* (2022).

Para el caso de los sistemas lagunares con microalgas, en la Tabla 1 se muestran las consideraciones de diseño tomadas en cuenta con base en los criterios de Mustafa *et al.* (2012) y de la South Australian Local Government Association, Flinders University y South Australian Department for Health and Wellbeing (2020) en función del caudal. El reactor UASB para cada tren tiene en promedio 7 h de tiempo de retención

hidráulica (TRH), una velocidad ascendente menor a 0.7 m/h y un nivel de agua de 5 m de altura, según lo especificado en Chernicharo *et al.* (2015).

Tabla 1. Consideraciones de diseño y dimensionamiento para el sistema lagunar con microalgas y el sedimentador secundario.

Rubro	Laguna de microalgas				Sedimentador secundario			
Caudal, l/s	5	15	25	50	5	15	25	50
Largo total de canal, m	630	1440	1850	2670				
Ancho de canal, m	15	20	25	35				
Nivel de agua, m	0.3	0.3	0.3	0.3	3.8	3.8	3.8	3.8
Diámetro, m					7	11	14	20
Área, m ²	9706	29256	46963	94848	38.4846	95	154	314
Volumen, m ³	2912	8776	14089	28458	146	361	585	1194
TRH, h	161.0	162.0	156.0	158.0	8.1	6.7	6.5	6.6
Potencia calculada kW-h/d	88.4	267.0	427.0	859.0				

Determinación de costos

Para el determinar el costo de inversión de los trenes de tratamiento se emplearon cotizaciones de equipo actualizadas al año 2022, hojas de cálculo y bases de datos propiedad de la empresa consultora ELNSYST, S.A. de C.V. (IBTech, www.ibtech.com.mx), especializada en tratamiento de aguas residuales. En este trabajo se calculó el costo de inversión y la operación para el tren UASB + laguna con microalgas (tren 7) en función del caudal de agua residual para insertar la información en las figuras de

costo de inversión y operación previamente hechas por Morgan-Sagastume *et al.* (2022) para las tecnologías convencionales más utilizadas en México en el ámbito municipal.

La estimación de costos tanto para el tren 7 como para los demás trenes de tratamiento se llevó a cabo por orden de magnitud (-15, +20%), por lo que ello sirve únicamente para tener una referencia y base de comparación de costos entre los trenes de tratamiento considerados.

El costeo por operación unitaria que incluye cada tren de tratamiento consideró la obra civil y el equipo electromecánico. Para el caso de los reactores UASB se incluye el manejo seguro del biogás y el quemado del mismo. El costo de tuberías, obra eléctrica e instrumentación se estimó como un porcentaje del costo del equipo/tanque de acuerdo con el proceso, considerando la cantidad de tuberías y mecanización del tren de tratamiento. Por último, después de la integración completa de los trenes de tratamiento, al costo de construcción estimado se le sumó un porcentaje del 30% correspondiente a costos administrativos y para el desarrollo de la ingeniería. El costeo de lagunas y humedales incluye la excavación, acarreo y compactación de tierra, y la instalación de geomembranas de polietileno de alta densidad para evitar la infiltración del agua en el subsuelo; no se incluye el costo del terreno.

El costo por operación y mantenimiento considera salarios de personal, energía eléctrica consumida y reactivos.

Resultados y discusión

En la Figura 2 y Figura 3 se muestra la comparación de costos de inversión y operación, respectivamente, en función del caudal tratado de aguas residuales para cada uno de los trenes de tratamiento considerados. En estas figuras se consideró un caudal máximo de 50 l/s a manera de ejemplo y por juzgar que se encuentra dentro de un intervalo adecuado para plantas pequeñas que toman en cuenta el uso de tecnologías extensivas altamente demandantes de área, como son las lagunas y humedales, aunque ciertamente podrían ser consideradas para caudales mayores.

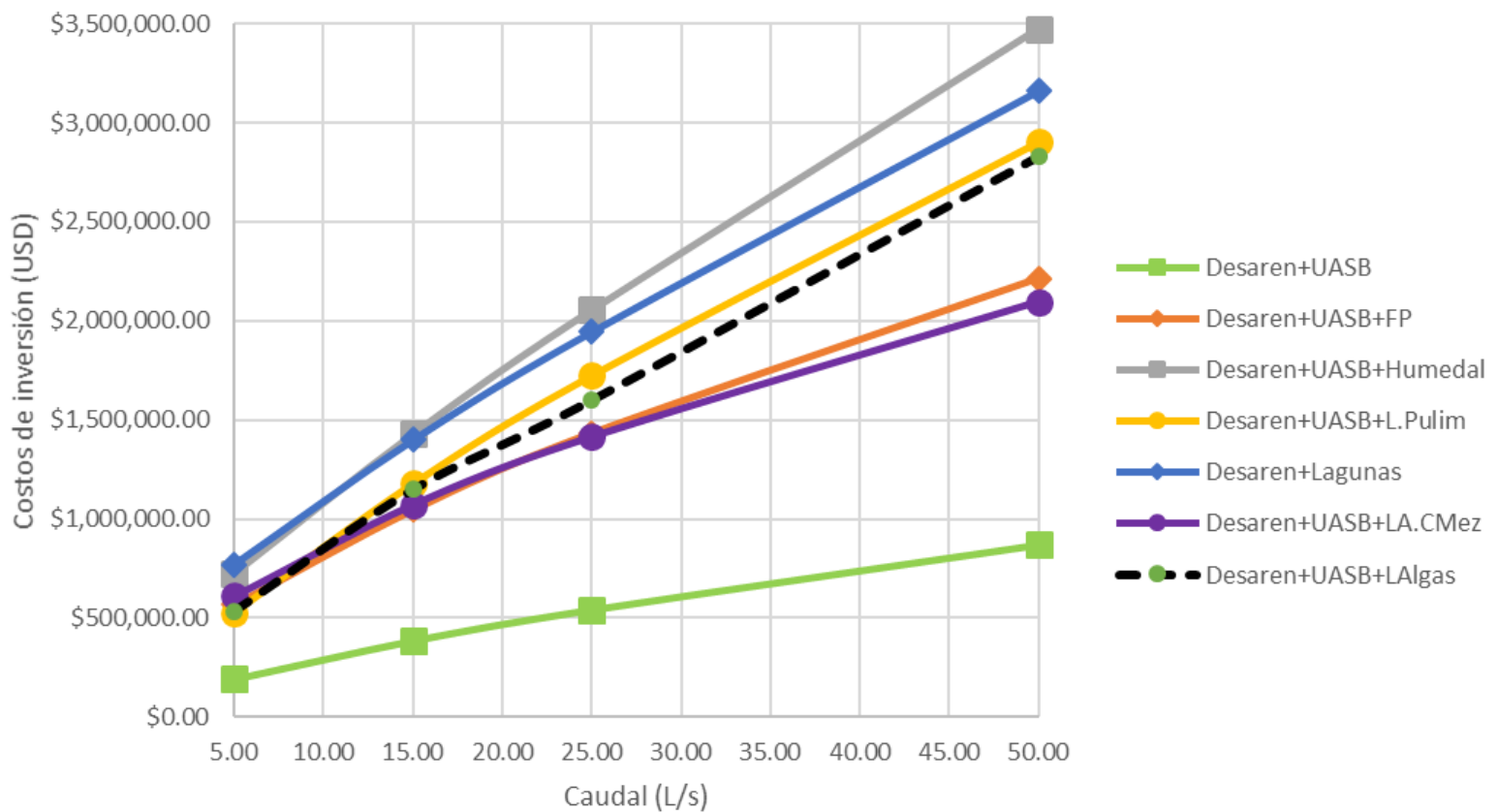


Figura 2. Estimación de costo de inversión en dólares de EUA (USD) para trenes de tratamiento de aguas residuales municipales en función del caudal.

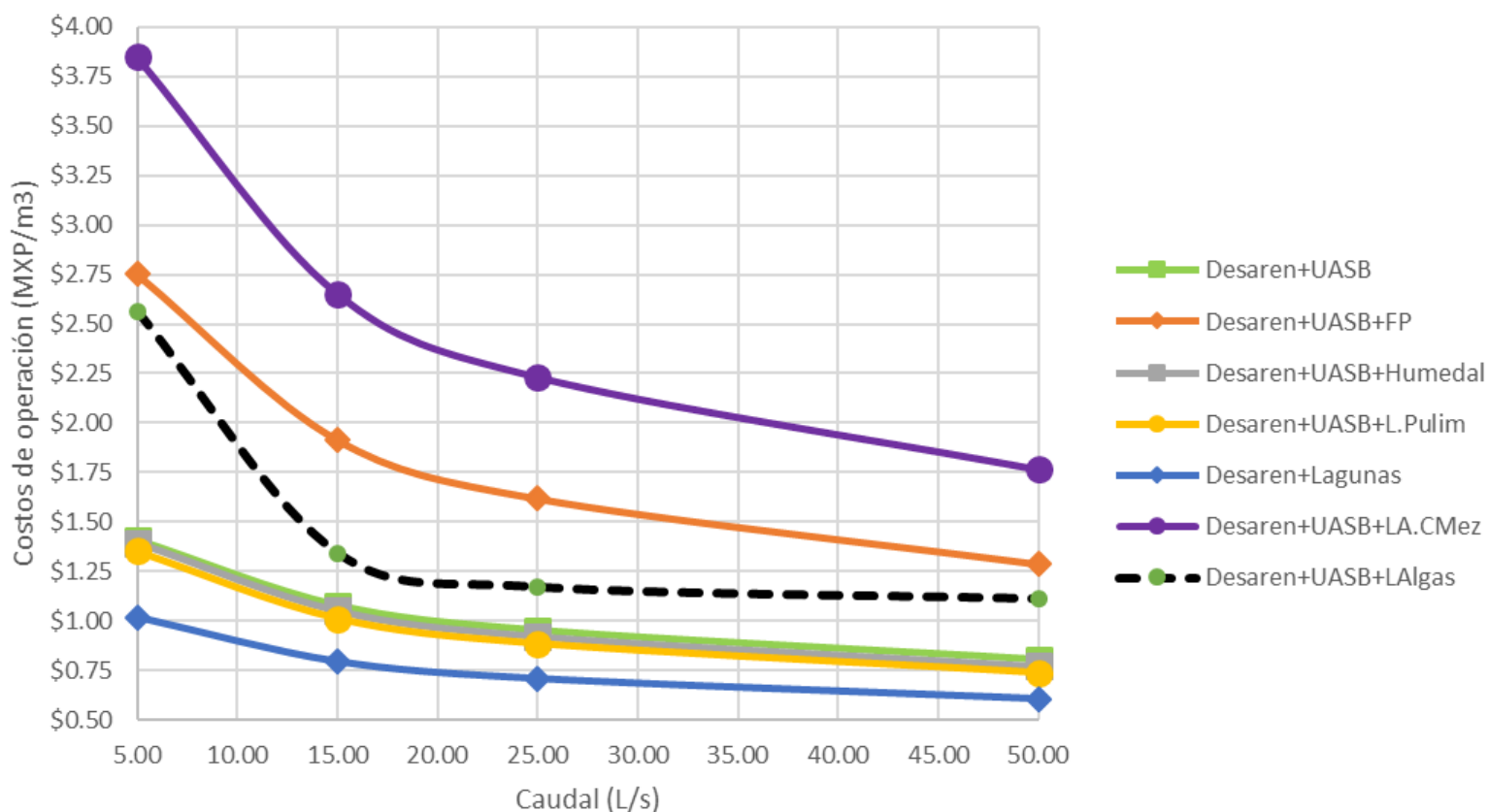


Figura 3. Estimación de costo de operación en dólares de EUA (USD) para trenes de tratamiento de aguas residuales municipales en función del caudal.

Con base en la Figura 2 y Figura 3 se pueden hacer las siguientes reflexiones:

El tren 1 constituido básicamente por un reactor anaerobio tipo UASB que no contempla ni siquiera una desinfección del agua tratada, no puede cumplir la normatividad vigente (Noyola *et al.*, 2013), por lo que requiere de un postratamiento de su efluente, aspecto que sí se considera en los demás trenes de tratamiento.

Los trenes de tratamiento del 2 al 6, mayormente utilizados para el tratamiento de aguas residuales municipales en México (Conagua, 2021), fueron conceptualizados para cumplir la antigua norma ya derogada NOM-001-SEMARNAT-1996 o en su defecto la norma vigente para reúso de agua tratada (NOM-003-SEMARNAT-1997), con un enfoque en la eliminación de materia orgánica disuelta y en suspensión, mas no para dar cumplimiento a la nueva norma NOM-001-SEMARNAT-2021, que exige, como ya se comentó, la eliminación de nutrientes. Para dar cumplimiento a la nueva norma habría que reconfigurar los procesos de tratamiento y rehabilitar las PTAR en este sentido, lo cual representa un enorme reto económico y técnico para el sector municipal. Por ejemplo, para el caso del sistema de lodos activados, habría que añadir tanques adicionales con medios anaerobios y anóxicos, lo cual requiere de altas inversiones en recursos (se estima, según cálculos de la empresa consultora ELNSYST, S.A. de C.V., un incremento del orden del 40 al 50% sobre la inversión mostrada en la Figura 2), y sobre todo un incremento importante en los costos de operación y mantenimiento. Se aclara que los montos de inversión y operación mostrados en la Figura 2 y Figura 3 para los trenes del 1 al 6 no contemplan las modificaciones que se deberían hacer para asegurar la eliminación de nutrientes. Estos trenes son los que se encuentran operando y en oferta en la actualidad en el mercado mexicano. El único tren de tratamiento que sí considera la eliminación de nutrientes es el tren 7, que corresponde al UASB con lagunas con microalgas; en ello estriba su crucial ventaja e importancia. En este sentido, García *et al.* (2006), y Park y Craggs (2011) observan altas eficacias de eliminación de material orgánico y nutrientes en los sistemas con microalgas, en comparación con sistemas convencionales de

tratamiento de aguas residuales. Asimismo, mostraron que con la adición de CO₂ se logra una eliminación del nitrógeno total y amoniacal de hasta el 69.1 y 84.5%, respectivamente.

El tren 6, con base en el sistema de lodos activados, es el sistema con mayor mecanización y demanda de energía, y por ello posee el valor más alto en cuanto a operación y mantenimiento. Sin embargo, el costo de inversión está por debajo de los sistemas extensivos con alta demanda de área y por lo tanto de excavación, recubrimiento de terreno y movimiento de tierra; ello, sin considerar el costo del terreno que habría que sumar a dicho costo.

En el ámbito municipal es más probable la obtención de recursos para la inversión que para la operación de la PTAR durante su vida útil (20 años, aproximadamente) (UNICEF, 2022). Por lo anterior, el peso específico que conlleva considerar el costo de operación sobre el de inversión para decidir la selección de tecnología debe ser mayor. Es muy probable encontrar en el mercado PTAR altamente mecanizadas en un estado de abandono debido a que los organismos operadores no pueden sufragar el costo de operación y mantenimiento (Conagua, 2021).

Las PTAR que consideran reactores anaerobios (o lagunas anaerobias) dentro de su tren de tratamiento deben captar y quemar el biogás para evitar la emanación a la atmósfera del poderoso GEI que es el metano. El uso del biogás como fuente de energía alterna no es factible económicamente en el ámbito municipal por debajo caudales de aguas residuales del orden de los 350 l/s (Morgan-Sagastume *et al.*, 2022). Por lo tanto, el subproducto más importante a obtener para su valorización es el lodo, que puede usarse como mejorador de suelos.

Los trenes con reactor UASB y lagunas con microalgas prácticamente tienen el mismo costo de inversión que los trenes con UASB y lagunas convencionales. Por otra parte, el costo de inversión de las lagunas convencionales sin reactor UASB (sistema más utilizado en el país en cuanto al número de instalaciones según Conagua) (Conagua, 2021) es superior al tren con lagunas con microalgas. Ciertamente es que este sistema es el que menor costo de operación y mantenimiento requiere de todos los sistemas considerados, cualidad que hace que los municipios se inclinen a escoger dicha tecnología (Noyola, Padilla, Morgan-Sagastume, Güereca, & Hernández, 2012). Sin embargo, se debe considerar lo que se expone a continuación.

Un punto muy importante es el hecho de que un sistema lagunar con microalgas no emite GEI; un sistema lagunar convencional sí lo hace, pues el biogás (metano) generado en la laguna anaerobia no se capta y se emite libremente a la atmósfera (Noyola, Paredes, Morgan-Sagastume, & Güereca, 2016). Si en las lagunas convencionales se considerara la captura de biogás generado por medio de un domo o cubierta de geomembrana, y su quemado con el debido manejo seguro del biogás (aspectos que deberían hacerse), el incremento en la inversión sería considerable a lo presentado en la Figura 2, al igual que el costo de operación y mantenimiento mostrado en la Figura 3.

Un tren de tratamiento con lagunas convencionales en general no asegura el cumplimiento continuo de la normatividad vigente para descarga a cuerpos de agua en lo que se refiere a la eliminación de nutrientes (N y P), a menos de que cuente con la presencia de microalgas en las lagunas de maduración (Conagua, 2007). En dicho sentido, aquellos municipios que cuenten con lagunas convencionales son

candidatos para convertir o rehabilitar sus PTAR en sistemas lagunares con microalgas, donde se aprovecharía al máximo la infraestructura ya existente, lo cual conlleva la disminución del costo de inversión comparado con una instalación nueva.

El tren de tratamiento con base en lagunas con microalgas asegura la no emisión de GEI y es el único que posee potencial para la valorización de las microalgas en el mercado a través de su cosecha y procesamiento, lo cual, en un ámbito regional adecuado donde se puedan comercializar, puede representar ingresos adicionales para la sustentación operativa de la PTAR, y alcanzar o superar el bajo nivel de costo operativo de los sistemas lagunares convencionales. En este aspecto, Park y Craggs (2011) reportan conseguir altas producciones de biomasa microalgal al finalizar el tratamiento, con un 80.5% de incremento con respecto al inicio de su operación.

Conclusiones

Los trenes de tratamiento utilizando un reactor UASB y lagunas con microalgas como postratamiento prácticamente tienen el mismo costo de inversión que los trenes con UASB y lagunas convencionales. Por otra parte, el costo de inversión de las lagunas convencionales sin reactor UASB es superior al tren con lagunas con microalgas.

El tren de tratamiento con base en lagunas con microalgas asegura la no emisión de gases de efecto invernadero (GEI) y es el único —comparado con las tecnologías convencionales de mayor uso en el ámbito mexicano— que posee potencial para la valorización de subproductos en el mercado a través de la cosecha y el procesamiento de

las microalgas, lo cual, en un ámbito regional adecuado donde se puedan comercializar estos subproductos, puede representar ingresos adicionales para la sustentación operativa de la PTAR, que puede alcanzar o superar el bajo nivel de costo operativo de los sistemas lagunares convencionales.

El sistema UASB con lagunas con microalgas es una buena opción a considerar para el tratamiento de aguas residuales municipales bajo el marco de la nueva NOM-001-SEMARNAT-2021, que exige la eliminación de nutrientes debido a su bajo costo operativo, a la capacidad de remoción de materia orgánica, nutrientes y a la posible valorización de sus subproductos (microalgas y lodos), características que pueden insertarse en un esquema de economía circular.

Aquellos municipios que cuenten con lagunas convencionales son candidatos para convertir o rehabilitar sus PTAR a sistemas lagunares con microalgas, donde se aprovecharía al máximo la infraestructura ya existente, lo cual conlleva la disminución del costo de inversión en comparación con una instalación nueva.

Agradecimientos

Se agradece al Instituto de Ingeniería de la UNAM el apoyo económico otorgado dentro del contexto del proyecto "Intensificación de procesos para la obtención de biocompuestos a partir de aguas residuales", así como a Ignacio Monje Ramírez, Armando González Sánchez e Isaura Yañez Noguéz por el apoyo y consejos otorgados. Al igual que a la empresa ELNSYST, S.A. de C.V. (IBTech) por la información proporcionada.

Referencias

- Amy, G., Brdjanovic, D., Comeau, Y., Edama, G., Orozco-García, J., & Al, E. (2017). *Tratamiento biológico de aguas residuales: principios modelación y diseño*. En: López-Vázquez, M. C., Buitrón-Méndez, G., García, H. A., & Cervantes-Carrillo, J. F (eds.). IWA Publishing. DOI: 10.2166/9781780409146
- Bahr, M., Díaz, I., Domínguez, A., González-Sánchez, A., & Muñoz, R. (2014). Microalgal-biotechnology as a platform for an integral biogas upgrading and nutrient removal from anaerobic effluents. *Environmental Science & Technology*, 48, 573-581. DOI: 10.1021/es403596m
- Chernicharo, C. A. L., Van Lier, J., Noyola, A., & Bressani-Ribeiro, T. (2015). Anaerobic sewage treatment: State of the art, constraints and challenges. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*. DOI: 10.1007/s11157-015-9377-3
- Conagua, Comisión Nacional del Agua. (2007). *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento: diseño de lagunas de estabilización*. Ciudad de México, México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales,
- Conagua, Comisión Nacional del Agua. (2012). *Agenda de Agua 2030 avances y logros 2012*. Recuperado de <https://www.conagua.gob.mx/Conagua07/Publicaciones/Publicaciones/SGP-10-12baja.pdf>

Conagua, Comisión Nacional del Agua. (2020). *Programa Nacional Hídrico 2020-2024*. Recuperado de <https://www.gob.mx/conagua/documentos/programa-nacional-hidrico-pnh-2020-2024>

Conagua, Comisión Nacional del Agua. (2021). *Situación del Subsector Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento*. Recuperado de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/702445/SGAPD-S-2-21-a_compressed.pdf

Craggs, R., Heubeck, S., Lundquist, T., & Benemann, J. (2011). Algal biofuels from wastewater treatment high rate algal ponds. *Water Science and Technology a Journal of the International Association on Water Pollution Research*, 63(4), 660-665.

Díaz-Trujillo, L. A., Tovar-Facio, J., Nápoles-Rivera, F., & Ponce-Ortega, J. M. (2019). Effective use of carbon pricing on climate change mitigation projects: Analysis of the biogas supply chain to substitute liquefied-petroleum gas in Mexico. *Processes*. DOI: 10.3390/pr7100668

García, J., Green, B., Lundquist, T., Mujeriego, R., Hernández-Mariné, M., & Oswald, W. (2006). Long term diurnal variations in contaminant removal in high rate ponds treating urban wastewater. *Bioresource Technology*, 97(14), 1709-1715.

Grobbelaar, J. U. (2004). Algal nutrition. In: Richmond, A. (ed.) *Microalgae culture: Biotechnology and Applied Phycology* (pp. 97-115). London, UK: Blackwell Publishing.

- Gonçalves, A. L., Pires, J. C. M., & Simões, M. (2017). A review on the use of microalgal consortia for wastewater treatment. *Algal Research*, 24, 403-415.
- Maroušek, J., Maroušková, A., Gavurová, B., Tuček, D., & Strunecký, O. (2023). Competitive algae biodiesel depends on advances in mass algae cultivation. *Bioresource Technology*. DOI: 10.1016/j.biortech.2023.128802
- Morgan-Sagastume, J. M. (2016). Análisis del estado de las plantas de tratamiento de aguas residuales en la República Mexicana. *Revista Agua y Saneamiento de la ANEAS*, 64, enero-febrero. Recuperado de https://www.aneas.com.mx/_files/ugd/9e7476_df0f9400b8974fe0b57c257e948bad33.pdf
- Morgan-Sagastume, J. M., Castro-Martínez, M., & Noyola, A. (2022). *Tecnologías para el desarrollo de un esquema integral de tratamiento de aguas residuales en la Península de Yucatán*. Recuperado de <https://www.amigosdesiankaan.org/guias-y-manuales/>
- Mustafa, E., Phang, S., & Chu, W. (2012). Use of an algal consortium of five algae in the treatment of landfill leachate using the high-rate algal pond system. *Journal of Applied Phycology*. DOI: 10.1007/s10811-011-9716-x
- Noyola, A., Padilla, A., Morgan-Sagastume, J. M., Güereca, L., & Hernández, F. (2012). Typology of municipal wastewater treatment technologies in Latin America. *Clean-Soil-Air-Water*, 40(9), 926-932. DOI: 10.1002/clen.201100707

- Noyola, A., Morgan-Sagastume, J. M., & Güereca, L. (2013). *Selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales municipales. Guía de apoyo para ciudades pequeñas y medianas*. Ciudad de México, México: Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Noyola, A., Paredes, M., Morgan-Sagastume, J. M., & Güereca, P. (2016). Reduction of greenhouse gas emissions from municipal wastewater treatment in Mexico based on technology selection. *Clean-Soil-Air-Water*, 44(9), 1091-1098. DOI: 10.1002/clen.201500084
- Orta, M. T., Monje-Ramírez, I., Velasquez-Orta, S., Rodríguez-Muñiz, V., & Yáñez-Nogues, I. (2017). Ozone for microalgae biomass harvesting from wastewater. *Ozone Science and Engineering*, 39, 264-272. DOI: 10.1080/01919512.2017.1322488
- Orta, M. T., Velasquez-Orta, S., Monje-Ramírez, I., & Yáñez, I. (2021). Novedoso sistema a escala piloto para el tratamiento agua residual/lixiviado y la captura de dióxido de carbono utilizando microalgas y ozonoflotación (ATZINTLI). *Revista H₂O*, 7(27), 34-36.
- Park, J., & Craggs, R. (2011). Nutrient removal in wastewater treatment high rate algal ponds with carbon dioxide addition. *Water Science & Technology*, 63(8), 1758-1764. DOI: 10.2166/wst.2011.114

Semarnat, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2022). *Norma Oficial Mexicana NOM-001 SEMARNAT-2021. Norma que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación*. Recuperado de https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5645374&fecha=11/03/2022#gsc.tab=0

South Australian Local Government Association, Flinders University & South Australian Department for Health and Wellbeing (2020). *High Rate Algal Pond (HRAP) Design Guideline. An element in CWMS Wastewater Treatment Trains*. Adelaide, Australia: South Australian Local Government Association.

UNICEF, Fondo de las Naciones Unidas para la Infancia. (2022) *Guía para la elaboración de estrategias financieras en materia de agua, saneamiento e higiene (WASH)*. New York, USA: Fondo de las Naciones Unidas para la Infancia.

Velasco, A., Franco-Morgado, M., Saldívar, A., Cuetero-Martínez, Y., Buitrón, G., De-los-Cobos-Vasconcelos, D., Monroy, O., & González-Sánchez, A. (2023). Organic leachate and biogas utilization in outdoor microalgae cultivation under alkaline conditions at pilot-scale. *Waste and Biomass Valorization*. DOI: 10.1007/s12649-023-02223-3

Velasquez-Orta, S. B., García-Estrada, R., Monje-Ramírez, I., Harvey, A., & Orta, M. T. (2014). Microalgae harvesting using ozoflotation: Effect on lipid and FAME recoveries. *Biomass and Bioenergy*, 70, 356-363. DOI: 10.1016/j.biombioe.2014.08.022

- Wang, B., Li, Y., Wu, N., & Lan, C. Q. (2008). CO₂ bio-mitigation using microalgae. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 79, 707-718.
- Zhang, B., Li, W., Guo, Y., Zhang, Z., Shi, W., Cui, F., Lens, P. N. L., & Tay, J. H. (2020). Microalgal-bacterial consortia: From interspecies interactions to biotechnological applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 118, 109563. DOI: 10.1016/j.rser.2019.109563